

# APLICACION DE LA TEORIA DE FIABILIDAD AL ESTABLECIMIENTO DE NIVELES DE SEGURIDAD EN TUNELES.

Laso Sanz, E.(%); Alarcón Alvarez, E.(!); Gómez Lera, M<sup>a</sup>.S.(!)

(%) Sociedad de Investigación, Estudios y Experimentación (SINEX).

Modesto Lafuente,41. 28003-Madrid. Tfn (91) 5349102. FAX (91) 5348715.

(!) Departamento de Mecánica Estructural y Construcciones Industriales. Universidad Politécnica de Madrid.

José Gutierrez Abascal,2. 28006-Madrid. Tfn (91) 5626200. FAX (91) 5618618.

**Resumen.-** El Objetivo de este trabajo ha sido la incorporación de métodos de Fiabilidad Estructural en Nivel II al cálculo de la estructura de sostenimiento de túneles.

**Abstract.-** The aim of this work has been to introduce the modern techniques of Structural Reliability in the design model proposed by the New Austrian Tunnelling Method.

## 1.- INTRODUCCION.

La perforación de túneles constituye una tarea clave en la mejora de las comunicaciones y en el desarrollo de la industria minera. Debido a su complejidad y al alto número de factores que influyen en su desarrollo, este tipo de proyectos han sido considerados tradicionalmente obras de alto e indefinido riesgo. La difusión del llamado Nuevo Método Austriaco (NATM, Ref.1,2,3), ha supuesto un gran impulso en la tecnificación de este tipo de proyectos. Paradójicamente, aun en la actualidad, el problema de los márgenes de seguridad en el cálculo se suele reducir en la práctica a la evaluación de un único coeficiente cuya definición no satisface los criterios actualmente aceptados en este campo.

En este trabajo (Ref.4,5,6) se ha pretendido, de acuerdo a las tendencias actuales, introducir las técnicas de Fiabilidad Estructural en el modelo de cálculo del sostenimiento propuesto por el NATM.

## 2.- MODELO MECANICO DEL PROBLEMA.

En la práctica, para dimensionar el sostenimiento de un túnel, los cálculos se suelen plantear a través del llamado Método de las Curvas Características.

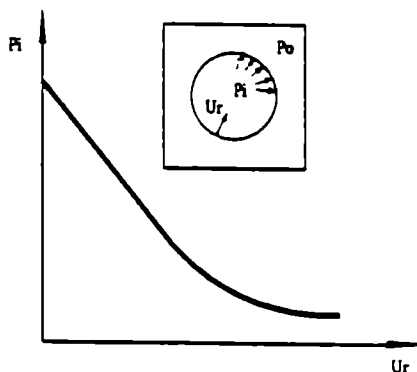


Fig.1 Curva Característica del terreno.

Se entiende por Curva Característica del terreno, la representación gráfica de la relación existente entre la

presión radial de interacción aplicada en un punto del contorno de la excavación y el valor del desplazamiento alcanzado en ese punto. (Fig.1). De la misma manera, la Curva Característica del Sostenimiento relaciona la presión radial ejercida sobre él, con los valores de desplazamiento radial producidos. (Fig.2). El punto de equilibrio en el problema viene determinado por la condición de compatibilidad y corresponde a la intersección entre ambas Curvas Características. Debe tenerse en cuenta el desfase existente en desplazamientos entre ellas,  $U_0$ , debido al retraso producido entre el momento de la excavación y el de puesta en obra del sostenimiento. (Fig.3). Tradicionalmente, el coeficiente de seguridad se define como el cociente entre la presión de rotura del sostenimiento y la presión de interacción que se alcance en el punto de equilibrio.

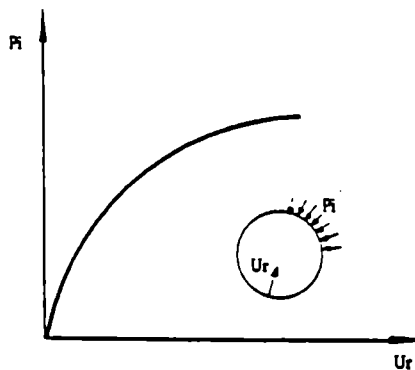


Fig.2 Curva Característica del sostenimiento.

Las Curvas Características tanto del terreno como del sostenimiento se suelen calcular, en cada caso, para estados planos de deformación. La mayor o menor complejidad en su formulación viene marcada por la magnitud de las hipótesis simplificativas adoptadas.

En este trabajo, la Curva Característica del terreno se obtiene de acuerdo al modelo bidimensional elasto-plástico propuesto por P. Fritz (Ref.7), que puede considerarse una generalización del modelo difundido por Rabcewicz (Ref.6). Por su parte, para el sostenimiento se ha obtenido una formulación no lineal para su Curva Característica en la que se tienen

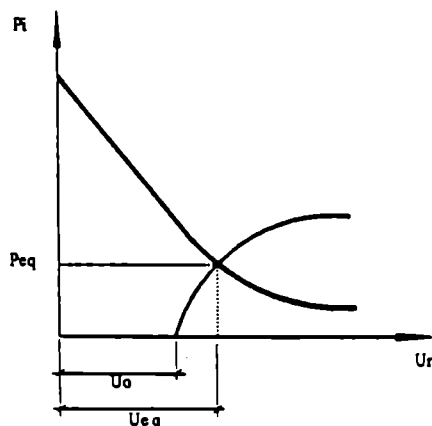


Fig.3 Determinación del punto de equilibrio.

en cuenta las aportaciones de los distintos elementos que lo forman: hormigón proyectado, armaduras y cerchas metálicas y bulones anclados en el terreno.

### 3.- MODELO DE FIABILIDAD PROPUESTO.

En lo que sigue se van a presentar las características básicas del modelo de Fiabilidad que se propone para el estudio del problema mecánico descrito en el apartado anterior:

#### 3.1.- Estados Límite considerados en el modelo.

De los distintos Estados Límite que deben ser considerados en el proyecto de túneles (Ref.8), para la realización de este trabajo se han escogido tres que se consideran básicos en el cálculo de la estructura de sostenimiento:

##### 1.- Estado Límite último de agotamiento de la capacidad resistente del terreno

Este estado se estudia con relación a una sección del conjunto terreno-sostenimiento y tiene por objetivo evitar el colapso de la excavación por disgregación del terreno.

Para estimar el grado de sollicitación del terreno, se estudia el radio de plastificación alcanzado en el equilibrio terreno-sostenimiento de acuerdo a las curvas características de ambos. De esta manera, el terreno se considera agotado por disgregación cuando la relación,  $\alpha$ , entre el radio de plastificación,  $\rho$ , y el radio de la excavación,  $R$ , alcanza el valor límite,  $\alpha^*$ , habitualmente cercano a 2, que se fija, en función del tipo de terreno, de acuerdo a criterios experimentales.

En aquellos casos en que el equilibrio se alcanza sin plastificación del terreno se ha utilizado como parámetro equivalente a  $\alpha$ , en el rango entre 0 y 1, el valor del factor O.S.R. (Over-Stressing Ratio) en el contorno de la excavación. El O.S.R. se define como el factor de proporcionalidad existente entre un estado tensional dado, y el homólogo para el que se alcanza la plastificación del material.

En el caso bidimensional, se se aplica el criterio de Mohr-Coulomb, se puede obtener una expresión analítica compacta de este parámetro:

$$O.S.R. = \frac{P_0 - P_i}{P_0 \operatorname{sen} \varphi + c \cos \varphi} \quad (1)$$

donde  $P_0$  es el valor de la presión inicial en el terreno y  $P_i$  la presión de interacción terreno-sostenimiento en el punto de equilibrio, y  $c$  y  $\varphi$  la cohesión y el ángulo de rozamiento interno.

Así la expresión general de la función y del criterio de fallo puede escribirse de la siguiente forma:

$$F F_1 = \alpha^* - \alpha \geq 0 \quad (2)$$

en los casos de equilibrio estático, el parámetro  $\alpha$ , se calcula mediante el factor O.S.R. en el contorno de la excavación (1), y en los restantes, en los que el terreno llega a plastificarse,  $\alpha$  viene dado por la relación  $\rho/R$ ,  $R$ , radio de la excavación,  $\rho$  radio de plastificación en el equilibrio.

##### 2.- Estado Límite último de agotamiento de la estructura de sostenimiento.

La condición de agotamiento se alcanza cuando la deformación del sostenimiento alcanza un valor máximo  $\epsilon'$ , definido como el límite admisible por el conjunto de los materiales que lo forman. En el caso general, este límite coincide con la deformación de rotura del hormigón en compresión simple. La Instrucción EH-91 fija este valor en  $\epsilon' = 0.0020$ .

Así pues, en cada caso, se deberá determinar en primer lugar el punto de equilibrio terreno-sostenimiento, como la intersección de las respectivas curvas características. Conocido este punto, el valor de la función de fallo viene dado por:

$$F F_2 = \epsilon^* - \frac{U_s}{R} = \epsilon^* - \frac{U_T - U_0}{R} \quad (3)$$

que resultará positiva cuando el punto de equilibrio sea seguro respecto a este Estado Límite.

En la expresión (3),  $U_s$  es el desplazamiento de la estructura,  $R$  el radio,  $U_T$  el desplazamiento en el contorno de la excavación en el punto de equilibrio y  $U_0$  el desplazamiento previo a la instalación del sostenimiento.

##### 3.- Estado Límite de servicio de deformación (convergencia) excesiva.

El límite de desplazamiento radial  $u'$  deberá establecerse en cada caso de acuerdo a la finalidad de la obra. Este desplazamiento se refiere al medido en

el sostenimiento instalado; cuando la excavación resulta autoestable se considera despreciable.

Como en los Estados Límite precedentes, en primer lugar deberá calcularse el punto de equilibrio presión-desplazamiento en la interacción terreno-sostenimiento cuando éste esté presente, o bien el desplazamiento en el terreno para presión de interacción nula en el caso de excavaciones autoportantes. Conocido el desplazamiento en el equilibrio,  $U_E$ , el valor de la función de fallo correspondiente a este tercer Estado Límite se obtiene directamente por diferencia con el límite fijado:

$$F F_3 = U^* - U_E \quad (4)$$

Como en las anteriores, valores positivos de la función de fallo se refieren a situaciones aceptables en relación al Estado Límite mientras que los negativos reproducen situaciones de fallo.

### 3.2.- Variables Aleatorias Básicas.

Para la definición del modelo de fiabilidad que se estudia, se han considerado variables aleatorias básicas las siguientes magnitudes:

*En relación con el terreno:*

- Módulo de Elasticidad,  $E_i$
- Módulo de Poisson,  $\nu_i$
- Angulo de rozamiento interno,  $\phi_i$
- Cohesión,  $C_i$
- Profundidad de la excavación,  $H$
- Peso específico,  $\gamma_i$

*En relación con la estructura:*

- Desplazamiento previo a la instalación del sostenimiento,  $U_0$
- Resistencia del hormigón,  $F_{CK}$
- Espesor,  $t$
- Radio,  $R$
- Cuantía geométrica de las armaduras,  $W_s$
- Sección de acero en cerchas,  $W_c$
- Longitud de los bulones,  $L_{bu}$
- Densidad de bulonaje,  $D_{bu}$
- Diámetro de los bulones,  $\phi_{bu}$

No necesariamente en todos los casos será necesario que todas las variables incluidas en la relación anterior actúen como tales variables estadísticas. Según los casos existirá la posibilidad de despreciar la variabilidad de algunas de ellas mediante la asignación de coeficientes de variación nulos.

Además de las variables básicas, en el modelo se consideran otra serie de parámetros cuya variabilidad se estima despreciable en relación a la de los anteriores. Por este motivo, se ha admitido que pueden fijarse para el cálculo de forma determinista. Entre estos últimos parámetros se incluyen los siguientes:

- El módulo de elasticidad del acero.
- Los límites elásticos de los aceros en cerchas, armaduras y bulones.

- La deformación de rotura del hormigón en compresión simple, etc.

### 3.3.- Procedimientos de Cálculo Aplicados

En el problema que se estudia, confluyen distintos factores que reducen las posibilidades de aplicación de los procedimientos clásicos de cálculo del Índice de Fiabilidad en Teoría de Primer Orden (F.O.S.M., Ref.9):

- La complejidad del modelo mecánico y su marcado carácter no lineal.
- El alto número de variables involucradas, algunas de las cuales con rangos de variación muy elevados.
- La imposibilidad de obtener expresiones analíticas explícitas de las funciones de fallo a partir de las variables básicas.

A pesar de que se continúa trabajando en la puesta a punto de un esquema de cálculo de este tipo, los intentos realizados muestran que, de cara a este problema, con el nivel de conocimiento actual, los métodos de primer orden pueden resultar inestables y costosos en cuanto a tiempo de cálculo.

Por este motivo, al plantearse el objetivo de elaborar un procedimiento de aplicabilidad general dentro del Nivel II, se ha recurrido también al Método de Estimación Puntual propuesto por E. Rosenblueth (P.E.M., Ref.10). En líneas generales el P.E.M. permite obtener una estimación de la media y la desviación típica del valor de una función dependiente de  $n$  variables aleatorias. Los datos de partida son los valores de estos mismos parámetros para cada una de las variables, además de la matriz de correlación entre ellas. El procedimiento se basa en la ejecución repetitiva del cálculo del valor de la función para un total de  $2^n$  combinaciones predefinidas de valores de las variables básicas del problema. A partir de la muestra de resultados así generada, la estimación de propiedades se realiza mediante un procedimiento sencillo en el que los coeficientes de correlación de las variables se tienen en cuenta como factores de ponderación.

En este caso, la aplicación del P.E.M. permite obtener una estimación del valor de la media y la desviación típica de las 3 funciones de fallo que se consideran a partir de la descripción en Nivel II del conjunto de variables básicas del modelo.

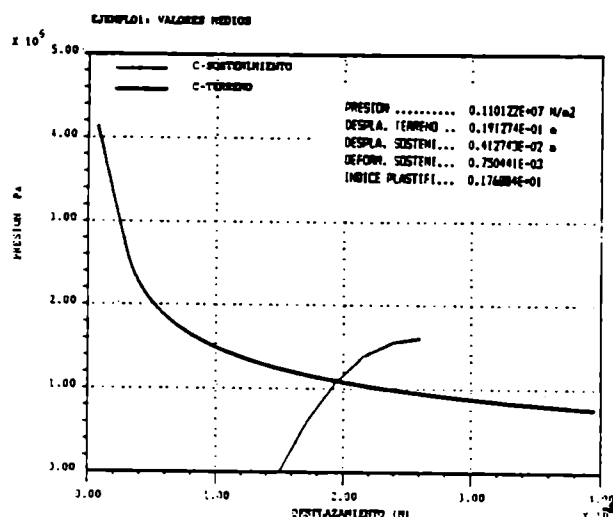
Si, por aplicación del Teorema Central del Límite, se acepta la hipótesis de normalidad para las variables aleatorias en que se distribuye el valor de las funciones de fallo, los correspondientes Índices de Fiabilidad se pueden calcular directamente de acuerdo a la definición de Cornell (Ref.11):

$$\beta_i = \frac{\mu_i}{\sigma_i} \quad (5)$$

y los valores nominales de probabilidades de fallo vendrán por tanto dadas por:

DESCRIPCION	Valor Medio	Coef.Var.	Desv.Tip.
1: MÓDULO DE ELASTICIDAD	0.4300E+10	0.3000E+02	0.1290E+10
2: COEFICIENTE DE POISSON	0.1900E+00	0.1000E+02	0.1900E+01
3: PESO ESPECÍFICO	0.2300E+05	0.5000E+01	0.1150E+04
4: PROFUNDIDAD	0.2000E+03	0.1000E+02	0.2000E+02
5: COHESION	0.1780E+04	0.1000E+02	0.7170E+05
6: ANGULO DE ROZAMIENTO	0.2750E+02	0.1700E+02	0.3829E+01
7: CONVERGENCIA INICIAL	0.1500E+01	0.4000E+02	0.6000E+02
8: RESISTENCIA HORIZONTAL	0.3110E+08	0.1500E+02	0.4465E+07
9: ESPESOR	0.2500E+00	0.2500E+02	0.6250E+01
10: RADIO	0.3500E+01	0.5000E+01	0.2750E+00
11: CANTIDAD ARMADURA	0.1500E+02	0.1000E+01	0.1500E+04
12: CANTIDAD CEMENTO	0.1384E+01	0.2000E+02	0.2748E+02
13: LONGITUD DE BULONES	0.6000E+01	0.1000E+02	0.6000E+00
14: DENSIDAD DE BULONES	0.1000E+01	0.3000E+02	0.3000E+00
15: DIÁMETRO DE BULONES	0.2500E+01	0.5000E+01	0.1250E+02

ESTADO LÍMITE	MEBIA	DES. TIP.	IND. FIAB.	PROB. FALLO
1 FALLO TERRENO	0.2224E+08	0.1702E+08	0.1307E+01	0.9397E-01
2 FALLO ESTRUCTURAL	0.7065E-03	0.7419E-03	0.1330E+01	0.9181E-01
3 EXCE. CONVERGENCIA	0.2441E-01	0.4157E-02	0.3871E+01	0.2632E-08



Resultados: Ejemplo 1.

$$P_f = \Phi [-\beta_f] \quad (6)$$

donde  $\Phi$  representa la función de distribución de la variable normal estándar (media cero y desviación típica 1).

Como complemento de lo anterior y de cara a elaborar recomendaciones de cálculo, se ha desarrollado también un procedimiento de interpolación lineal de la superficie de fallo a partir de la muestra de valores generada por aplicación del P.E.M. De esta forma, por aplicación de la definición

de Índice de Fiabilidad de Hasofer-Lind (Ref. 12), es posible obtener una estimación del valor de los Coeficientes de Sensibilidad del modelo. Esto facilita la elaboración de una propuesta para los valores de los coeficientes de ponderación a incorporar en un modelo de cálculo de Nivel I.

#### 4.- RESULTADOS.

En este apartado se presentan algunos resultados obtenidos de la aplicación del modelo de Fiabilidad a situaciones reales de proyecto. Se incluyen 2 ejemplos de aplicación directa, así como conclusiones de estudios paramétricos y de determinación de coeficientes parciales de ponderación.

##### 4.1.- Ejemplos.

Como ilustración del método propuesto se presentan dos ejemplos de cálculo. En ambos se han mantenido los mismos datos en cuanto a control de Estados Límite. Estos últimos se han establecido como sigue:

- Estado límite de agotamiento del terreno: Índice de plastificación máximo igual a 2
- Estado límite de agotamiento del sostenimiento: Deformación crítica igual a 0.0020
- Estado límite de deformación excesiva: Desplazamiento radial máximo admisible igual a 3 cm

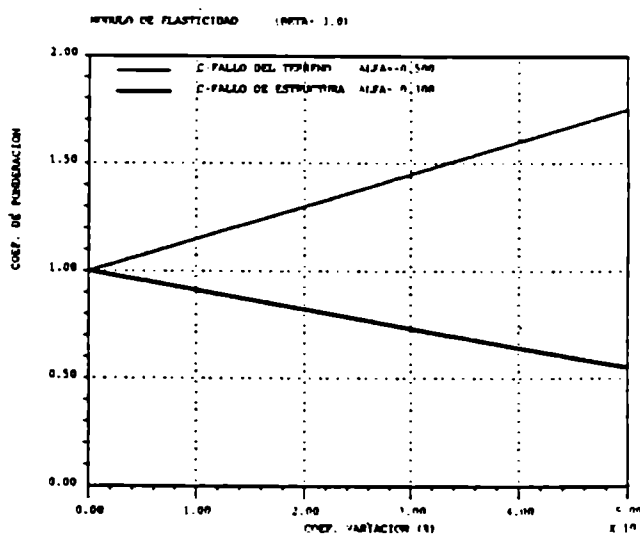


Fig.4 Curva de Proyecto correspondiente a  $E_t$

Ejemplo 1: Corresponde a una situación de tipo general en el cálculo. Al estudiar el comportamiento del modelo para valores medios se puede comprobar que el coeficiente de seguridad convencional es del orden de 1.5. El análisis de fiabilidad resulta mucho más conservador y establece índices en torno a 1.3, para los dos primeros Estados Límite, lo que representa probabilidades nominales de fallo del orden del 10%

- En el Estado Límite 2, puede apreciarse que aunque en valores medios la estructura no esté solicitada, determinadas combinaciones de valores de las variables, de acuerdo a su distribución, hacen que sí llegue a estarlo, y se estima en 0.57% la probabilidad de que llegue a agotarse el sostenimiento propuesto.

- El Estado Límite 3, como era de esperar, es el que presenta un margen de seguridad más amplio ( $\beta=4$ )

#### 4.2.- Cálculo de Factores de Ponderación.

Como objetivo final del estudio realizado se presentan las conclusiones alcanzadas en el desarrollo de un formato de cálculo basado en factores parciales de ponderación (formato LRFD, Ref.13). Para ello se han realizado diversos estudios paramétricos y se ha aplicado de forma crítica el procedimiento de interpolación lineal de la superficie de fallo para estimar el valor de los coeficientes de sensibilidad de las variables. La combinación de ambos procedimientos ha permitido dibujar, para cada variable, curvas de proyecto del tipo de la representada en la figura 4; en ella se representa, para cada Estado Límite, definido un valor objetivo del Índice de Fiabilidad, el valor del coeficiente de ponderación que es necesario aplicar a la variable en función de su grado de dispersión. Como conclusión, la Tabla 1 recoge los valores para  $\beta=3$  de acuerdo a los coeficientes de variación asignados a las variables básicas en los ejemplos presentados en el epígrafe anterior.

#### CALIBRACION DE COEFICIENTES DE PONDERACION

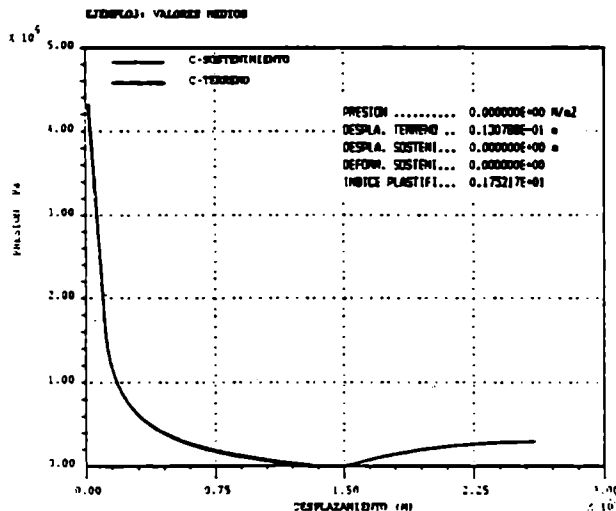
VALORES PARA  $\beta = 3$

VARIABLE	COEF. DE VARIACION NOMINAL	COEF. DE PONDERACION: BETA=3	
		EST. LIMITE I	EST. LIMITE 2,3
MODULO ELASTICIDAD	3%	1.05	0.73
COEFICIENTE DE POISSON	3%	1.05	1.05
PESO ESPECIFICO	5%	1.05	1.11
PROFUNDIDAD	3%	1.05	1.11
CONEXION	4%	0.82	0.64
ANGULO DE ROZAMIENTO	17%	0.643	0.749
CONVERGENCIA INICIAL	4%	1.05	0.64
RESISTENCIA NOMINAL	15%	0.95	0.91
ESPESOR	25%	0.897	0.893
RADIO	5%	0.993	1.023
CANTIA ARMADORAS	10%	0.98	0.95
CANTIA CERCAS	20%	0.97	0.97
LONGITUD DE BULONES	10%	0.98	0.95
DENSIDAD DE BULONES	3%	0.99	0.95
DIAMETRO DE BULONES	5%	0.993	0.993
COEFICIENTE DE POISSON	3%	0.98	0.95

Tabla 1. Coeficientes de ponderacion propuestos para  $B=3$ .

DESCRIPCION	Valor Medio	Coef.Var.	Dev.Tio.
1:MODULO DE ELASTICIDAD	0.2000E+11	0.3500E+02	0.7000E+10
2:COEFICIENTE DE POISSON	0.2600E+00	0.1000E+02	0.2600E+01
3:PESO ESPECIFICO	0.2400E+05	0.5000E+01	0.1200E+04
4:PROFUNDIDAD	0.2000E+03	0.1000E+02	0.2000E+02
5:CONEXION	0.3500E+06	0.4000E+02	0.1400E+06
6:ANGULO DE ROZAMIENTO	0.3500E+02	0.1700E+02	0.3930E+01
7:CONVERGENCIA INICIAL	0.1500E+01	0.4000E+02	0.6000E+02
8:RESISTENCIA NOMINAL	0.3110E+08	0.1500E+02	0.4663E+07
9:ESPESOR	0.5000E+01	0.2500E+02	0.1250E+01
10:RADIO	0.5500E+01	0.5000E+01	0.2750E+00
11:CANTIA ARMADORAS	0.3600E+02	0.1000E+01	0.3600E+04
12:LONGITUD DE BULONES	0.4000E+01	0.1000E+02	0.4000E+00
14:DENSIDAD DE BULONES	0.5000E+00	0.3000E+02	0.1500E+00
15:DIAMETRO DE BULONES	0.2500E+01	0.5000E+01	0.1250E+02

ESTADO LIMITE	RESUL.	DESP. TIP.	IND. FIAB.	PROB.FALLO
1 FALLO TERRENO	0.2630E+00	0.3103E+00	0.8242E+00	0.2943E+00
2 FALLO ESTRUCTURA	0.1382E+02	0.6267E+03	0.2523E+01	0.5765E+02
3 EXCE. CONVERGENCIA	0.2154E+01	0.7767E+02	0.4040E+01	0.2466E+04



#### Resultados: Ejemplo 2.

Ejemplo 2: Para este ejemplo, se ha seleccionado una excavación autoestable en valores medios. Con estos valores, el sostenimiento definido no resulta efectivo ya que antes de su colocación no se alcanza el equilibrio con presión de interacción nula. Al examinar los resultados del análisis de Fiabilidad se pone de manifiesto el efecto de la dispersión en el valor de las variables:

- Respecto al estado Límite 1, el Índice de Fiabilidad sólo alcanza un valor de 0.82, lo que representa una probabilidad de fallo por agotamiento del terreno del 20%

## 5.- CONCLUSIONES.

El presente trabajo ha tenido como objetivo la aplicación de técnicas de Fiabilidad al cálculo de estructuras de sostenimiento en túneles. En el desarrollo se ha tomado como punto de partida el método de cálculo de las Curvas Características, para lo cual se han formulado las correspondientes leyes de comportamiento del terreno y del sostenimiento. Se han establecido 3 Estados Límite de referencia y se ha seleccionado un conjunto de variables básicas representativas del problema estudiado. Finalmente la aplicación de los conceptos de Fiabilidad Estructural en Nivel II junto con el algoritmo de estimación puntual de E. Rosenblueth, han permitido el desarrollo de modelos de cálculo que permiten la determinación de los Índices de Fiabilidad Estructural respecto a los 3 Estados Límite considerados.

El esquema descrito ha sido implementado en programas de cálculo. Estos programas de cálculo han sido utilizados en el estudio de diversos ejemplos correspondientes a situaciones reales de proyecto y se han desarrollado diversos estudios paramétricos. Todo ello ha permitido comprobar la validez del procedimiento desarrollado y llegar al establecimiento de una propuesta de calibración de factores parciales de ponderación que podrían ser incorporados en recomendaciones prácticas de cálculo.

## 6.- AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo ha sido desarrollado parcialmente bajo contrato con el Área de Seguridad Minera del Instituto Tecnológico Geominero de España. Los autores desean expresar su gratitud por el apoyo recibido por parte de los ingenieros de este departamento.

## 7.- REFERENCIAS.

1. Von Rabcewicz L.: "The New Austrian Tunnelling Method". Water Power, 1964-65.
2. Von Rabcewicz L.: "Stability of Tunnels Under Rock Load". Water Power, 1969.
3. Von Rabcewicz L.: "Principles of Dimensioning the Supporting System for the New Austrian Tunnelling Method". Water Power, 1973.
4. Gómez-Lera M<sup>a</sup>. S., Alarcón E.: "Introducción a la Fiabilidad Estructural y Algunas Aplicaciones". Monografías del I.T.C.C., n<sup>o</sup> 408, Abril, 1992.
5. I.T.G.M.E. - SINEX, S.A.: "Establecimiento de Niveles de Seguridad en Túneles y Galerías". Instituto Tecnológico Geominero de España, 1989-1991.
6. Laso E.: "Aplicación de Métodos de Fiabilidad en Nivel II al Cálculo de la Estructura de Sostenimiento de Túneles". Tesis Doctoral E.T.S.I. Industriales. Universidad Politécnica de Madrid, 1991.
7. Fritz P.: "An Analytical Solution for Axisymmetric Tunnel Problems in Elasto-

viscoplastic Media". International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. Vol. 8; 1984.

8. ITA W.G. on General Approaches to the Design of Tunnels: "Guidelines for the Design of Tunnels". Tunnelling and Ground Space Technology, Vol 3, N.3, 1988.
9. J.C.C.S.: "First Order Reliability Concepts for Design Codes". C.E.B. Bulletin No. 112, 1976.
10. Rosenblueth E.: "Two Points Estimates in Probabilities". Applied Mathematical Modelling. Octubre 1981.
11. Cornell C.A.: "A Probability-based Structural Code". Journal of the American Concrete Institute, Vol.66, No. 12, 1969.
12. Hasofer A.M., Lind N.C.: "Exact and Invariant Second Moment Code Format". Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol 100, 1979.
13. ASCE, Journal of the Structural Division: "Eight LRFD Papers". Vol, 104, No. ST9, Septiembre 1987.